

## TRATAMIENTO DE LAS INCERTIDUMBRES EN EL ANÁLISIS PROBABILISTA DE CAMBIOS DE AOT

S. Martorell(\*). M. Villamizar, J.F. Villanueva, S. Carlos, A. Sánchez

Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia, España  
marville@doctor.upv.es, (\*) smartore@iqn.upv.es, jovillo0@iqn.upv.es

### Resumen

La operación segura de las Centrales Nucleares (CCNN) depende de las Especificaciones Técnicas (ETF), por tanto las ETF forman parte de base de licencia (BL) para operar una CN, las cuales se establecieron teniendo en cuenta criterios principalmente deterministas. El desarrollo de APS (Análisis Probabilista de Seguridad) y su aplicación desde principios de los 80 para analizar los cambios ETF ha permitido revisar la consistencia de ETF desde un punto de vista del riesgo, es decir, abordar el impacto de los cambios en la seguridad de la planta sobre la base de las informaciones de riesgo APS, en particular al papel del tiempo máximo permitido de inoperabilidad (AOT) incluido en las condiciones límite de operación (CLO). En (Martorell et al. 2010), se presentó una visión general de aplicación del APS que se refieren al análisis de cambios en los requisitos del tiempo máximo permitido de inoperabilidad (AOT), además de una orientación para el tratamiento de las incertidumbres. Se discutió cómo los varios tipos de incertidumbres epistémicas requieren ser caracterizadas y manejadas dentro de la aplicación de APS, en particular, para evaluar el impacto en el riesgo de un cambio AOT incluida en las CLO. El objetivo de este documento se centra en el uso de análisis de importancia en el enfoque propuesto. Se proporciona un estudio de caso que se centra en un cambio AOT del sistema de acumuladores de una planta de Energía Nuclear con un APS de nivel 1.

### 1. Introducción

La operación segura de las centrales nucleares (CCNN) descansa en gran medida sobre los requisitos operacionales establecidos en la Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) y por ello forman parte de las bases de licencia de explotación. Sin embargo, la observación de diferentes problemas atribuidos a su establecimiento a partir de criterios deterministas (Bizzak et al., 1987) y el desarrollo de los APS ha motivado que desde comienzos de los años 80 se haya auspiciado, tanto desde los organismos reguladores como desde la industria nuclear en todo el mundo, las aplicaciones de métodos probabilistas para el estudio de los cambios en ETF informadas en el riesgo, estimando y utilizando los modelos y datos del APS, con el doble objetivo de mejora de la seguridad y la flexibilidad de la explotación de las CCNN. En particular de cambios en los requisitos del tiempo máximo permitido de inoperabilidad (AOT), incluidos en las Condiciones Límite de Operación (CLO) y en la extensión de los intervalos de prueba de vigilancia (STI), incluidos dentro de los Requisitos de Vigilancia (RV) contenidos en las ETF.

En respuesta a esa problemática, a mediados de los años 90 nace una nueva filosofía de análisis de requisitos de ETF en EEUU que plantea simultanear criterios puramente probabilistas con criterios deterministas. Con esta finalidad, la Nuclear Regulatory Commission (NRC) emite la RG 1.174 (RG 1.174, 2002) y en particular la RG 1.177 (RG

1.177, 1998), tratando de fomentar las aplicaciones del APS para el análisis de cambios en las ETF bajo lo que se denominó RITS (Risk Informed Technical Specification) que combina la información probabilista con la determinista. La RG 1.174 fija los principios generales a considerar en el proceso de licenciamiento de las distintas aplicaciones del APS en la industria nuclear, mientras que la RG 1.177 se centra en la evaluación y mejora, del análisis de cambios en las ETF utilizando APS. En este contexto, los modelos y datos del APS a utilizar en el análisis de cambios de ETF, debe adaptarse teniendo en cuenta el requisito particular del caso de estudio, por ejemplo, STI o AOT.

A pesar de que las RG 1.174 y RG 1.177 requieren que todas las fuentes de incertidumbre que forman parte del análisis de APS sean identificadas y analizadas de tal manera que su impacto sea comprendido, no sólo a nivel de su incidencia en la medida de riesgo final, sino también a nivel de elemento técnico básico; es sólo recientemente cuando se propone algunas orientaciones sobre el tratamiento sistemático de incertidumbres asociadas con el uso de la APS en la toma de decisiones informada en el riesgo NUREG-1855, (NUREG-1855, 2009) y EPRI-1016737, (EPRI-1016737,2008). Además, en (Martorell et al. 2010) se proponen directrices específicas para el tratamiento de las incertidumbres en el análisis de los cambios de ETF.

En (Martorell et al. 2010), se propone un enfoque y caso de aplicación para el tratamiento de las incertidumbres dentro del marco de toma de decisiones informada de riesgo para evaluar el análisis de cambios en los requisitos del tiempo máximo permitido de inoperabilidad (AOT) utilizando un APS de nivel 1. Se presentan las características del modelo APS, medidas de riesgo y criterios de aceptación necesarios en la evaluación del cambio. Se identifican los tipos y fuentes de incertidumbre necesarias en la aplicación de cambios AOT utilizando el APS. Se presenta la caracterización y gestión de incertidumbres epistémicas utilizando datos y modelos del APS, en particular, para el análisis de los efectos en el riesgo de un cambio AOT. Además, se presentó una orientación general para la evaluación del impacto de las incertidumbres presentes en la evaluación de cambios de AOT en el riesgo teniendo en cuenta los criterios particulares de aceptación, en los que se apoya la toma de decisiones de cambios de AOT.

Esta ponencia se centra en el uso de un análisis de importancia adoptando tanto medidas tradicionales como medidas de importancia a la incertidumbre, dentro del enfoque propuesto. Se presenta un caso de estudio centrado en cambios de AOT del sistema de acumuladores de una planta de Energía Nuclear con un APS de nivel 1.

## **2. Descripción funcional del AOT**

Los cambios en las ETF pueden afectar diferentes categorías, diferenciando la forma de analizar los cambios asociadas a las CLO y los asociados a los RV. Sin embargo, en la presente ponencia nos centraremos en cambios asociadas a las CLO, asociado al sistema de acumuladores.

El sistema de acumuladores de una central nuclear de tipo PWR se compone de tres trenes redundantes. La ETF para el sistema de acumuladores resulta aplicable para el modo 1, que corresponde al modo de funcionamiento a plena potencia. La ETF para el sistema de acumuladores durante la operación a plena potencia en las CCNN requiere la OPERABILIDAD de tres trenes redundantes. La inoperabilidad del sistema de acumuladores puede obedecer a dos circunstancias: 1) Forzada: se podría entrar en

una CLO para reparar equipos inoperables o para la realización de mantenimiento correctivo (MC). 2) Programada o No Forzada: es decir se induce a entrar en CLO para la realización de alguna actividad programada, por ejemplo para realizar mantenimiento preventivo (PM) o pruebas al sistema de acumuladores.

Por tanto, la ACCION es necesaria cuando un tren se encuentre inoperable, lo que implica un tiempo permitido de inoperabilidad limitado por el AOT, dentro del cual se debe restaurar la condición de operabilidad del equipo. La ETF establece los RV los cuales determinan periodos de vigilancia para garantizar la disponibilidad del componente y reducir el riesgo base de planta. En otras palabras, están dirigidos a probar que los equipos en este caso del sistema de acumuladores no se encuentran inoperables. En las CLO se definen los periodos máximos de indisponibilidad de una función dado por el (AOT), en este caso, de un tren del sistema de acumuladores una vez se detecta inoperable. La CLO del sistema de acumuladores establece una duración máxima de 1 hora como límite cuando uno de los tres trenes del sistema se encuentra inoperable. El objetivo es justificar la posibilidad de una extensión del AOT de 1 hora hasta 24 horas en base a riesgo e incorporando el tratamiento de las incertidumbres.

### **3. Metodología de análisis de cambios en requisitos operacionales en base a riesgo considerando el efecto de las incertidumbres**

La guía reguladora RG 1.174 establece en la sección 2.2.2 que las propuestas de cambios, en general en las bases de la licencia y en particular en las ETF, deben demostrar y justificar que la magnitud del incremento del riesgo, determinado por FDN (Frecuencia de Daño al Núcleo) y/o FGLT (Frecuencia de Grandes Liberaciones Tempranas), si lo hay, es pequeño y no excede los criterios de aceptación, con la consideración explícita del efecto de las incertidumbres.

En este contexto, la RG 1.174 establece que la utilización del APS como herramienta útil en la toma de decisiones informadas en el riesgo debe tener en cuenta tres aspectos: 1) Disponer de un modelo APS que presente: el alcance, el nivel de detalle y el grado de actualización necesaria, dependiendo del tipo particular de aplicación (cambio de AOT o STI). 2) Obtener los resultados del APS, es decir, los resultados de la valoración en términos de FDN y/o FGLT, “antes y después del cambio”. 3) Caracterizar el impacto en el riesgo de las incertidumbres incluidas en el análisis, así como comparar dichos resultados con las directrices de aceptación. Esta guía es aplicable para el análisis de cualquier cambio en bases de licencia, y por tanto aplica a cambios en ETF, tanto STI como AOT.

Además, exclusivamente respecto a cambios de ETF, la RG 1.177 en la sección 2.3 establece un método de tres etapas para evaluar el impacto en el riesgo asociado con los cambios propuestos. En la primera etapa se debe evaluar el cambio en el riesgo de la central debido al cambio propuesto. Tal cambio en el riesgo se expresa por el incremento en la  $\Delta FDN$  y por el incremento de probabilidad de daño al núcleo  $\Delta IPDN$ , y cuando corresponda, por el incremento  $\Delta FGLT$ , y por el incremento de probabilidad de liberación grande y temprana  $\Delta IPGLT$ . Los cuatro valores mencionados anteriormente deben ser comparados con los criterios de aceptación correspondientes.

En la segunda etapa se debe identificar las configuraciones potenciales de alto riesgo que pudieran presentarse, por ejemplo, si además del equipo asociado al cambio se pusiera fuera de servicio simultáneamente uno o más equipos adicionales, o se

presentaran pruebas simultaneas en equipos redundantes, entre otros. Finalmente, en la tercera etapa se debe establecer un programa de monitorización de la condición, para asegurar que configuraciones potenciales de alto riesgo resultantes de mantenimientos y otras actividades operativas sean identificadas.

Esta ponencia se centra en las dos primeras etapas. Según se establece en las citadas guías. En la primera etapa, el licenciario debe evaluar el impacto en el riesgo de cambios en ETF sobre la FDN y FGLT cuando corresponda. El licenciario debe demostrar que el APS y la extensión de modelos y datos del APS en su caso, es adecuado para evaluar la propuesta de cambio en las ETF y que cumple con los criterios de aceptación establecidos para los análisis de seguridad teniendo en cuenta las incertidumbres. En la segunda etapa, el uso de medidas de importancia y medidas de sensibilidad puede ayudar a identificar configuraciones de alto riesgo si además del equipo asociado al cambio se pusiera fuera de servicio simultáneamente más equipos. Figura 1 esquematiza las etapas del procedimiento específico que se propone para el análisis de cambios en las ETF, particularmente AOT, basado en la aplicación del APS, que considera, de manera integrada, el tratamiento de las incertidumbres en la cuantificación y análisis del impacto en el riesgo del cambio propuesto.

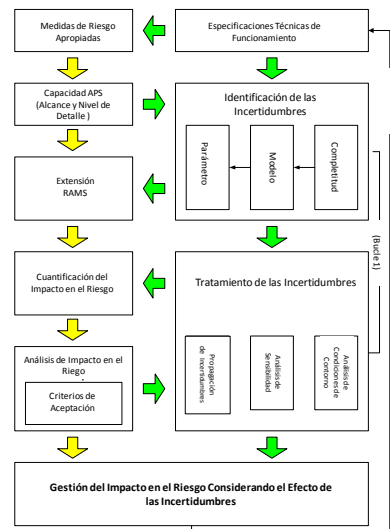


Figura 1. Enfoque utilizado para evaluar cambios en ETF, utilizando los resultados del APS.

#### 4. Métricas de Riesgo

Los resultados numéricos de la aplicación APS pueden utilizarse para derivar las mediciones de riesgo necesarios incluyendo su incertidumbre asociada, que luego se comparará con los criterios de aceptación adecuados para la toma de decisiones informada en el riesgo basada en argumentos cuantitativos. Las medidas de riesgo y los criterios de aceptación dependen del caso particular del ETF que se esté analizando. En el apéndice de la RG 1.177 (1998) y CR/NUREG 6141 (1994) se presentan las medidas de riesgo aplicables para evaluar el impacto en el riesgo de cambios de AOT: 1) Riesgo instantáneo, 2) Riesgo simple y 3) Riesgo anual, las cuales se pueden formular como sigue:

$$\Delta R_M = R_1 - R_0 \quad (1)$$

$$r_M = d_M \cdot \Delta R_M \quad (2)$$

$$R_M = f_M \cdot r_M = f_M \cdot d_M \cdot \Delta R_M = u_M \cdot \Delta R_M \quad (3)$$

Las ecuaciones 1 a 3 se particularizan en esta ponencia, en términos de FDN como medida de riesgo base de planta obtenida con un APS de Nivel I, por tanto:

$$\Delta FDN_M = FDN_1 - FDN_0 \quad (4)$$

$$ICPDN_M = d_M - \Delta FDN_M \quad (5)$$

$$FDN_M = f_M \cdot ICPDN_M = u_M \cdot \Delta FDN_M \quad (6)$$

La ecuación (4) representa el incremento de nivel de riesgo debido a que el componente esta indisponible por mantenimiento,  $FDN_1$  [años<sup>-1</sup>]; mientras que  $FDN_0$  [años<sup>-1</sup>], representa el riesgo condicional cuando se sabe que el equipo no está fuera de servicio, comparado con el riesgo base de planta  $FDN$  [años<sup>-1</sup>].

La ecuación (5) representa el incremento condicional de la probabilidad de daño al núcleo, ( $ICPDN_M$ ) [adimensional], donde  $d_M$  [años] es el tiempo de indisponibilidad asociado con el AOT.

La ecuación (6) representa la contribución de la desviación al riesgo medio a largo plazo, generalmente a un año, el cual se puede interpretar como el producto de la frecuencia de ocurrencia de la desviación a lo largo de un año,  $f_M$  [año<sup>-1</sup>] por el riesgo simple asociado a la duración de la desviación.

## 5. Medidas de impacto en el riesgo

Con carácter general, la guía RG 1.174 establece que se debe estimar dos medidas de riesgo para evaluar el impacto en el riesgo del cambio propuesto en las bases de licencia, incluidos cambios en AOT. Estos son la frecuencia de daño al núcleo antes del cambio  $FDN_{antes}$  y el incremento de la  $\Delta FDN$ , que se presentan a continuación:

$$\Delta FDN = FDN_{despues} - FDN_{antes} \quad (7)$$

Donde  $FDN_{antes}$  y la  $FDN_{despues}$  son la FDN (antes) y (después) de la propuesta de cambio de AOT, respectivamente.

Se puede demostrar la siguiente relación usando la ley de probabilidad total:

$$FDN = FDN_0 + u_M \cdot \Delta FDN_M = FDN_0 + FDN_M \quad (8)$$

donde, la  $FDN_M$  está dada por la ecuación (6). Rescribiendo la ecuación (7) utilizando la ecuación (6) y (8) se obtiene:

$$\Delta FDN = (u_{M,despues} - u_{M,antes}) \cdot \Delta FDN_M = \Delta u_M \cdot \Delta FDN_M \quad (9)$$

donde,  $\Delta u_M = f_M \cdot (d_{M, despues} - d_{M, antes})$  representa la diferencia en la contribución a la indisponibilidad del equipo debida a la indisponibilidad antes y después del cambio del AOT.

Al utilizar un APS de Nivel I son necesarias dos mediciones de riesgo,  $FDN_{antes}$  y el  $\Delta FDN$ , que se pueden calcular utilizando dos alternativas. La primera alternativa (**Tier 1**) es utilizar la ecuación (9), que relaciona de forma explícita las dos medidas de

riesgo. Por tanto, con un APS de nivel I se puede calcular el riesgo instantáneo  $\Delta FDN_M$ , siguiendo las instrucciones proporcionadas por el Apéndice B de (CR/NUREG-6141, 1994) y en el Apéndice A de (RG 1.177, 1998), además del cálculo de la diferencia en la contribución a la indisponibilidad del equipo debida a la indisponibilidad  $\Delta u_M$ . La segunda alternativa (**Tier 2**), utiliza los resultados del APS de nivel I directamente, es decir utiliza la ecuación (7). La primera alternativa presenta una formulación muy útil ya que, utiliza los sucesos básicos que contribuyen al riesgo del AOT, por ejemplo, calcula el impacto en el riesgo del cambio de AOT que depende de la indisponibilidad de algún equipo debido a la indisponibilidad por mantenimiento  $\Delta u_M$ , y su posición en la estructura del APS, siendo  $\Delta FDN_M$  una medida de vulnerabilidad de la planta por la indisponibilidad del equipo.

La RG 1.177 establece para el caso particular de estudiar cambios en las ETF, por ejemplo en el requisito AOT, que se debe estimar el nivel de riesgo condicional de la planta asociado con la indisponibilidad del equipo cuyo AOT se está analizando, el cual, se puede formular utilizando la ecuación (5), donde, se representa el riesgo simple por el ICCDP<sub>M</sub>, siendo  $d_{M,a}$  la duración media la indisponibilidad del equipo, acotada por el AOT o duración máxima permitida de la indisponibilidad tras el cambio de AOT. Además, la RG 1.177 proporciona las directrices de aceptación sobre las medidas de riesgo necesarias en la evaluación de cambios incluidos en las condiciones límite de operación, por ejemplo para  $\Delta FDN_M$ , formulado por la ecuación (4), y por lo tanto, puede ser considerado como una tercera medida de riesgo en el análisis del impacto de riesgo del cambio de AOT.

## 6. Tratamiento de las incertidumbres

La importancia del estudio de las incertidumbres, se debe, a que permite establecer un nivel de confianza asociado a una conclusión basada en una evaluación cuantitativa del riesgo. En este contexto, las guías reguladoras RG 1.174, RG 1.177, EPRI 1016737 y NUREG 1.855; consideran dos tipos de incertidumbres, la aleatoria y la epistémica; las primeras reflejan nuestra incapacidad de predecir sucesos de naturaleza aleatoria con total certeza, tales como por ejemplo lanzar una moneda al aire. Las segundas, también conocidas como incertidumbres “state-of-knowledge” reflejan el grado de confianza que tenemos en el modelo que representa nuestro conocimiento de la realidad. Dentro de la incertidumbre epistémica reconoce tres clases de incertidumbres: la de parámetro, la de modelo y la de completitud.

Las medidas de riesgo y los criterios de aceptación dependen del caso particular del ETF que se esté analizando. Por tanto, es necesario que los resultados del análisis del impacto en el riesgo considerando el efecto de las incertidumbres se presenten de una manera compatible con la forma en que los resultados van a ser utilizados. Existen varias alternativas de presentación de resultados:

- 1) Distribución de probabilidad continua sobre los resultados numéricos
- 2) Distribución de probabilidad discreta que represente el impacto de los diferentes modelos e hipótesis.
- 3) Estudio de sensibilidad que proporcione un conjunto de resultados que representan las diferentes hipótesis, modelos o parámetros; que presentan un grado alto de incertidumbre.
- 4) Límites o rangos de resultados, que representen hipótesis extremas.

La alternativa elegible depende en gran medida del tipo de incertidumbre de que se trate. Puesto que lo usual es tener varios tipos de incertidumbre (de parámetro, de

modelo y de completitud), lo usual es que el analista recurra a una combinación de los tipos de presentación anteriores.

## 7. Cuantificación de los efectos de riesgo

Los usos del APS para el análisis de cambios en ETF con información en el Riesgo, permiten llevar a cabo la cuantificación de las medidas de riesgo teniendo en cuenta un tratamiento adecuado de las incertidumbres asociadas. El apéndice A de (RG 1.177, 1998) y el apéndice B de (CR/NUREG 6141 1994) proporcionan la orientación sobre el uso de APS para el cálculo de las medidas de riesgo requeridas. Sin embargo en ellas, no se ha propuesto ninguna orientación específica, para el tratamiento de incertidumbres en el análisis de cambios de las ETF, por lo que se utilizara la formulación para evaluar el impacto en el riesgo presentado anteriormente.

Existen varias formas de cuantificación de las medidas de riesgo tras un cambio ETF mediante el APS, utilizando los modelos originales o modelos apropiados de RAM que consideren de forma explícita los parámetros relevantes de los requisitos ETF que van a formar parte del proceso de toma de decisiones. Además, la RG 1.177 concreta las medidas de riesgo de interés para el análisis del impacto en el riesgo de cambios en ETF que es necesario calcular según el requisito, en este caso AOT (en CLO). Además, se debe tener en cuenta el efecto del nivel de truncación en la generación de los conjuntos de corte mínimo en el APS, un adecuado nivel de truncación evita el no tratar con sucesos básicos que contribuyen de forma poco significativa.

Una vez establecido en nivel de truncación mas adecuado para el cálculo de las medidas de riesgo adecuadas para evaluar el cambio de ETF, este debe ser reducido en al menos una orden de magnitud y estudiar el efecto de la variación. Ya que, al disminuir el nivel de truncación considerado se produce un aumento en la FDN, tanto en la cuantificación anterior al cambio como en la posterior, y permite evaluar la variación (diferencia entre antes y después del cambio) con respecto al caso base.

## 8. Análisis del impacto en el riesgo

Los resultados del análisis del impacto en el riesgo del cambio de ETF (ecuaciones 1 a la 6 presentadas en la sección 4), se presentan teniendo en cuenta el efecto de las incertidumbres para su comparación con los objetivos o metas de seguridad probabilistas. Estos objetivos de seguridad están establecidos en las guías RG 1.174 y RG 1.177 en forma de metas que se formulan mediante valores numéricos de aceptación. El resultado de dicha comparación debe poner de manifiesto si las incertidumbres son relevantes, o no, para la toma de decisiones sobre aceptabilidad del cambio de AOT.

Como se presentó en la sección 5, RG 1.174 establece dos mediciones de riesgo para evaluar el impacto del riesgo de cualquier cambio ETF, incluyendo AOT. Se debe estimar el nivel de riesgo, FDN antes y después del cambio en las bases de licencia y el incremento del riesgo en términos  $\Delta FDN$  para APS nivel I. Así pues, los resultados de las evaluaciones se han de comparar con el criterio de aceptación para la FDN y  $\Delta FDN$  propuestos en la RG 1.174, se pretende conocer por tanto, si la incertidumbre asociada a la medida de riesgo calculada está dentro de los límites de seguridad sobre todo cuando el valor medio está cerca de dichos límites. Sin embargo, utilizar las distribuciones de probabilidad de los parámetros de entrada en lugar de los valores medios permite la propagación de las incertidumbres para identificar las incertidumbres a asociadas al resultado final, el cual se obtiene propagando las distribuciones de incertidumbre de los sucesos básicos.

Para el análisis de la aceptabilidad de cambios en una ETF, y en particular para un AOT en las CLO, se han de considerar, de forma adicional a lo establecido en el apartado anterior, los criterios de aceptación sobre el riesgo condicional y sobre el riesgo simple, que se proponen en la RG 1.177. Así, si se está utilizando la FDN para cuantificar el riesgo se recomienda que el riesgo simple, denominado ICPDN (Incremento Condicional de la Probabilidad de Daño al Núcleo) no supere el valor de  $5 \cdot 10^{-7}$ . Respecto al riesgo condicional, un valor que se suele tomar como límite umbral del riesgo condicional, utilizando la FDN como medida de riesgo, corresponde a  $110^{-3}$  años<sup>-1</sup>, que representa el incremento condicional de la FDN.

## 9. Análisis de importancia

Las RG 1.174 y RG 1.177 requieren que todas las fuentes de incertidumbre sean identificadas y analizadas. Las medidas de importancia suministran un camino muy útil para caracterizar los factores que contribuyen de forma significativa al nivel de riesgo alcanzado tras el cambio de AOT, haciendo posible la ordenación de dichos factores o sucesos básicos según su importancia. El análisis de sensibilidad ayuda a conocer la influencia que la variación de la probabilidad de un suceso básico tiene sobre el nivel de riesgo tras el cambio de AOT. El análisis de importancia y el análisis de sensibilidad pueden ayudar a la identificación los parámetros que mayor impacto tienen sobre las diferentes medidas de riesgo, y su influencia en la incertidumbre de los resultados obtenidos en la cuantificación de dichas medidas.

El enfoque propuesto en este ponencia se centra en el análisis de importancia utilizando medidas tradicionales y el uso de medidas de sensibilidad propuesto por (Aven & Nokland 2010). La Tabla 1 muestra las medidas de importancia y sensibilidad con relación a la medida de riesgo correspondientes utilizando un APS nivel I.

Medidas de Importancia	RG 1.177 Medidas de riesgo		RG 1.174 Medidas de Riesgo	
	FDN <sub>b</sub>	ΔFDN	ICPDN	FDN <sub>1</sub>
Fussell-Vesely (FV)	Tier 1	Tier 1	Tier 1	n.a.
Risk Achieve. Worth (RAW)	Upper Limit	Upper limit	Tier 2	n.a.
Spearman Rank (SR)	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre

Tabla 1. Medidas de importancia y aplicación.

## 10. Caso de aplicación

Este apartado presenta el resultado de la aplicación de la metodología descrita en los apartados precedentes para el caso particular de evaluación de una extensión del AOT del sistema de acumuladores. El sistema de acumuladores constituye la parte pasiva de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo, cuya misión es producir una inyección rápida de agua borada en el reactor. En la Figura 2 se presenta el diagrama general del sistema de acumuladores.



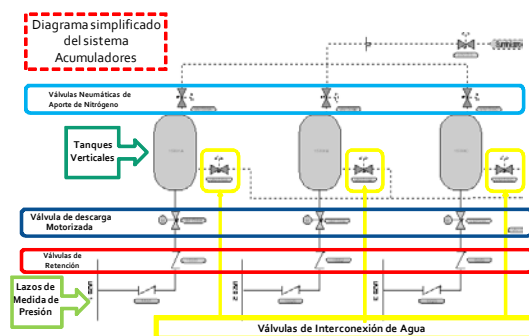


Figura 2. Diagrama simplificado del sistema de Acumuladores.

### 10.1. Formulación del problema

La CLO del Sistema de Acumuladores establece una duración máxima de 1 hora como límite cuando uno de los tres trenes del sistema se encuentra inoperable. El objetivo es justificar la posibilidad de una extensión del AOT de 1 hora hasta 24 horas en base a riesgo e incorporando el tratamiento de las incertidumbres.

### 10.2. Alcance del APS

El alcance del APS del que se dispone (APS de nivel 1 a plena potencia), es adecuado ya que se está evaluando un sistema de mitigación de accidentes iniciados durante la operación a potencia, cuya función es evitar el daño al núcleo. Al revisar el modelo del sistema de acumuladores en el APS original se observa que se contempla como criterio de éxito del sistema el descargar el contenido útil de 2 acumuladores en el núcleo, habiéndose desestimado la posibilidad de que el acumulador contenga agua borada con una concentración no permitida por ETF. En la Tabla 2 se presentan los datos necesarios para cuantificar los sucesos básicos incluidos en el modelo de árbol de fallos del sistema de Acumuladores, de tal manera que el nivel de detalle que se aporta es el adecuado para analizar el impacto en el riesgo de cambios de ETF de dicho sistema en concreto cambios en AOT y los análisis de importancia, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbres.

DESCRIPCIÓN	SUCESOS	MODELO	Función de Distribución
Mantenimiento eléctrico de la válvula VM-1508A	1M11A158AM	Demanda	Log-normal( $3.18 \cdot 10^{-3}$ ;3)
Mantenimiento eléctrico de la válvula VM-1508B	1M11A158BM	Demanda	Log-normal( $3.18 \cdot 10^{-3}$ ;3)
Mantenimiento eléctrico de la válvula VM-1508C	1M11A158CM	Demanda	Log-normal( $3.18 \cdot 10^{-3}$ ;3)
Válvula motorizada VM-1508A falla a permanecer abierta	1VM15008AO	Pruebas	Gama( $1.57 \cdot 10^{-7}$ ; $3.46 \cdot 10^{-8}$ ; $4.38 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula retención 10027 falla a la apertura	1VR100027A	Pruebas	Gama( $7.33 \cdot 10^{-8}$ ; $1.60 \cdot 10^{-8}$ ; $2.04 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula retención 15051 falla a la apertura	1VR150051A	Pruebas	Gama( $7.33 \cdot 10^{-8}$ ; $1.60 \cdot 10^{-8}$ ; $2.04 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula motorizada VM-1508B falla a permanecer abierta	1VM15008BO	Pruebas	Gama( $1.57 \cdot 10^{-7}$ ; $3.46 \cdot 10^{-8}$ ; $4.38 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula retención 10028 falla a la apertura	1VR100028A	Pruebas	Gama( $7.33 \cdot 10^{-8}$ ; $1.60 \cdot 10^{-8}$ ; $2.04 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula retención 15052 falla a la apertura	1VR150052A	Pruebas	Gama( $7.33 \cdot 10^{-8}$ ; $1.60 \cdot 10^{-8}$ ; $2.04 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula motorizada VM-1508C Fallo a permanecer abierta	1VM15008CO	Pruebas	Gama( $1.57 \cdot 10^{-7}$ ; $3.46 \cdot 10^{-8}$ ; $4.38 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula retención 10029 falla a la apertura	1VR100029A	Pruebas	Gama( $7.33 \cdot 10^{-8}$ ; $1.60 \cdot 10^{-8}$ ; $2.04 \cdot 10^{-7}$ )
Válvula retención 15053 falla a la apertura	1VR150053A	Pruebas	Gama( $7.33 \cdot 10^{-8}$ ; $1.60 \cdot 10^{-8}$ ; $2.04 \cdot 10^{-7}$ )

Tabla 2. Sucesos básicos pertenecientes al sistema de acumuladores.

A continuación, en la Figura 3, se presenta una visión esquemática del suceso TOP del árbol de fallos del sistema acumuladores.

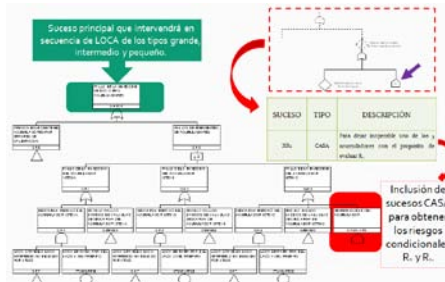


Figura 3. Árbol de Fallos simplificado del sistema Acumuladores.

### 10.3. Evaluación de los efectos de riesgo

Se utiliza un APS de Nivel I en el cálculo del riesgo condicional antes del cambio  $FDN_{antes}$ . Asimismo, permite calcular los riesgos condicionales  $FDN_1$  y  $FDN_0$ , con un valor del nivel de truncación de  $1 \cdot 10^{-10}$ , y el incremento del riesgo  $\Delta FDN_M$ . Para el cálculo del riesgo simple (denominado  $ICPDN_M$ ), se tiene en cuenta el incremento del riesgo entre las situaciones condicionales para el AOT (extensión del AOT de los acumuladores de 1 a 24 horas), y la duración de la indisponibilidad media  $d$ . Para el cálculo del riesgo anual,  $FDN_M$ , que es la contribución acumulada anual de todas las indisponibilidades generadas por un mismo tipo de entrada en CLO correspondiente con el AOT de estudio, la frecuencia con que ocurre la CLO dada por datos de planta es de  $f=0.004874$  años<sup>-1</sup>, permitiendo calcular la tercera medida de riesgo,  $\Delta FDN$ , considerada anteriormente dada por las ecuaciones (7) o (9); necesaria para calcular el punto  $[FDN_{antes}, \Delta FDN]$  en la región correspondiente de acuerdo al primer criterio de aceptación establecido en RG 1.174. En la Tabla 3, se resumen las diferentes medidas de riesgo obtenidas anteriormente para ser comparadas con los umbrales de aceptación y de esta forma asegurar, que las incertidumbres no comprometan los resultados alcanzados.

Medidas de Riesgo	Umbral de Aceptación	Resultados			Observaciones
		Media	5%	95%	
$R_1$ (año <sup>-1</sup> )	$R_1 < 1 E-03$	3,085E-05	8,488E-06	8,095E-05	Después del cambio
$r = ICPDN$	$r < 5 E-07$	4,396E-09	3,023E-10	1,534E-08	Después del cambio
$\Delta FDN$ (año <sup>-1</sup> )	$\Delta R < 1 E-06$	2,067E-11	6,9109E-13	7,811E-11	Después del cambio

Tabla 3. Resumen de resultados de las medidas de riesgo calculadas.

### 10.4 Medidas de importancia del riesgo

En esta sección se presenta los resultados de la aplicación de las medidas de importancia y sensibilidad propuestas en la sección 9 Tabla 1. En la Tabla 4 se resumen los resultados con respecto al riesgo base  $FDN_{antes}$ . La Tabla 5 resume los resultados para  $\Delta FDN$ . La Tabla 6 resume los resultados para el riesgo simple ICCDP. Finalmente la Tabla 6 se presenta los resultados para  $FDN_1$ .

Basic Event	FV	RAW	SR
...			
1VM15008AO	8.26E-6	1.041	-0.003
1VM15008BO	8.26E-6	1.041	-0.003
1VR100027A	≈ 0	1.000	0.013
1VR150051A	≈ 0	1.000	0.013
1M11A158AM	≈ 0	1.000	-0.031
1M11A158BM	≈ 0	1.000	-0.031
1VR100028A	≈ 0	1.000	0.013
1VR150052A	≈ 0	1.000	0.013
...			

Tabla 4. Medidas de importancia para la  $FDN$

Basic Event	FV	RAW	SR
1VM15008AO	0.254	1260	0.26
1VM15008BO	0.254	1260	0.26
1VR100027A	0.101	1082	0.18
1VR150051A	0.101	1082	0.18
1M11A158AM	0.043	1082	0.04
1M11A158BM	0.043	1082	0.04
1VR100028A	0.101	1082	0.18
1VR150052A	0.101	1082	0.18

Tabla 5. Medidas de importancia para la  $\Delta FDN$

Basic Event	FV	RAW	SR
...			
1VM15008AO	2.75E-5	1.14	0.002
1VM15008BO	2.75E-5	1.14	0.002
1VR100027A	1.10E-5	1.12	0.001
1VR150051A	1.10E-5	1.12	0.001
1M1A158AM	4.64E-5	1.12	≈ 0
1M1A158BM	4.64E-5	1.12	-0.031
1VR100028A	1.10E-5	1.12	0.001
1VR150052A	1.10E-5	1.12	≈ 0
...			

Tabla 6. Medidas de importancia para la ICCDP.

Basic Event	FV	RAW	SR
...			
1VM15008AO	n.a.	n.a.	-0.001
1VM15008BO	n.a.	n.a.	-0.001
1VR100027A	n.a.	n.a.	0.012
1VR150051A	n.a.	n.a.	0.012
1M1A158AM	n.a.	n.a.	-0.029
1M1A158BM	n.a.	n.a.	-0.029
1VR100028A	n.a.	n.a.	0.012
1VR150052A	n.a.	n.a.	0.012
...			

Tabla 7. Medidas de importancia para la FDN<sub>1</sub>.

## 11. Observaciones finales

Este caso de aplicación aporta una nueva experiencia en la aplicación de la RG 1.174, en particular para el análisis de cambios en ETF, considerando el efecto de las incertidumbres. Es importante resaltar dentro del enfoque propuesto la integración de medidas de importancia tradicionales y las medidas de sensibilidad para evaluar la importancia de las incertidumbres. Se presentó una aplicación al análisis de un cambio de AOT para el sistema de acumuladores de una planta nuclear, incluyendo las incertidumbres, además de, una nueva formulación para evaluar el impacto en el riesgo y los criterios adicionales a considerar sobre la aceptabilidad del cambio. Se muestra que el impacto en las diferentes medidas de riesgo, teniendo en cuenta el efecto de las incertidumbres es pequeño, ya que, los resultados de las medidas de riesgo están muy por debajo de los umbrales con respecto a las directrices de aceptación específicas para los cambios de la AOT RG 1.177 (Tabla 3), lo que significa que el cambio puede considerarse. Se confirman las conclusiones del párrafo anterior tras observar los resultados del análisis de importancia utilizando medidas tradicionales y sensibilidad en el caso de la evaluación de las incertidumbres (Tablas 4 a 7). La ponencia ofrece una primera experiencia en la evaluación de los efectos de riesgo de los cambios AOT, incluido el tratamiento de las incertidumbres consistentes con el nuevo contexto metodológico propuesto en la literatura.

## Agradecimientos

El trabajo presentado forma parte del proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, ENE2010-17449.

## Referencias

- Aven, T. & T.E. Nokland (2010). On the use of uncertainty importance measures in reliability and risk analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 95, 127-133.
- Apostolakis, G. (1993). A commentary on model uncertainty. In: Mosleh, A., Siu, N., Smidts, C., Lui, C. (Eds.), *Proceedings of Workshop on Model Uncertainty: Its Characterization and Quantification*, Annapolis, MD, October 20–22, Center for Reliability Engineering, University of Maryland, College Park, MD, 1993. Also published as Report NUREG/CP-0138, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- Bizzak, D.J., M.E. Stella, J.R. Stukus (1987). "Identification and Classification of Technical Specification Problems", EPRI NP-54-75. Electric Power Research Institute.
- EPRI 1016737 (2008). Electric Power Research Institute, "Treatment of Parameter and Model Uncertainty for Probabilistic Risk Assessments".
- Martorell, S., J.F. Villanueva, Y. Nebot, S. Carlos, V. Serradell (2004). Current trends in risk-informed changes to limiting conditions for operation. 15th European Safety and Reliability Conference (ESREL), Berlin.
- Martorell, S., M. Villamizar, J.F. Villanueva, S. Carlos, A. I. Sanchez (2010). Risk-Informed decision-making on changes to Allowed Outage Times addressing uncertainties. European Safety and Reliability Conference (ESREL), Rhodes.
- NUREG/CR-6141, BNL-NUREG-52398 (1994). "Handbook of Methods for Risk-Based Analyses of Technical Specifications", USNRC.
- NUREG 1855 Vol 1 (2009). "Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making", USNRC.
- RG 1.177 (1998). "An Approach For Plant-Specific, Risk-Informed Decision making: Technical Specifications", USNRC.
- RG 1.174 (2002). "An Approach For Using Probabilistic Risk Assessment In Risk-Informed Decisions On Plant-Specific Changes To The Licensing Basis", USNRC.
- Zio, E. & Apostolakis, G (1996). Two methods for the structured assessment of model uncertainty by experts in performance assessments of radioactive waste repositories. *Reliability Engineering and System Safety*, 54, 225-241.